

## Planejamento da Expansão de Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica.

Welton Verly<sup>1</sup> & Edimar José de Oliveira<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Aluno do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora – Brasil

<sup>2</sup> Professor Associado da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora – Brasil

**Abstract:** Transmission Systems Expansion Planning. This article presents the agreed use of the heuristic and meta-heuristic methodologies to solve the problem of expansion planning of electrical transmission systems. The discrete nature of the problem allows innumerable investments possibilities and a large search space. Therefore, the proposed methodology uses a constructive heuristic algorithm to generate the initial data set of the Genetic Algorithm (GAC). In this sense, tries to reduce the search space to obtain good quality solutions with a lower computational time. The obtained results are compared with other methodologies in literature that uses real equivalent systems.

**Key words:** Genetic Algorithm, Crossover, Mutation, Reproduction, Constructive Heuristical Method.

**Resumo:** Este artigo apresenta o uso combinado das metodologias heurísticas e metaheurísticas para a solução do problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão de energia elétrica. A natureza discreta do problema faz com que existam inúmeras possibilidades de investimento e um grande espaço de busca. Desta forma, a metodologia proposta utiliza um algoritmo heurístico construtivo para gerar o conjunto de dados iniciais para aplicação do Algoritmo Genético (AG). Neste sentido, pretende-se reduzir o espaço de busca, encontrando soluções de boa qualidade com menor tempo computacional. Os resultados obtidos são comparados com outras metodologias encontradas na literatura, utilizando-se sistemas equivalentes reais.

**Key words:** — Algoritmo Genético, Crossover, Mutação, Reprodução, Método Heurístico Construtivo.

### I. Introdução

O setor de energia elétrica brasileiro enfrenta profundas alterações, uma vez que o cenário de desverticalização da indústria introduz a competição nos segmentos de geração e comercialização de energia. Nesse contexto, o planejamento da expansão de sistemas de transmissão torna-se uma tarefa difícil devido às incertezas de mercado e de algumas características peculiares como: alta taxa de crescimento,

predominância de geração hidráulica e transporte de grandes blocos de energia.

O planejamento de expansão de sistemas de transmissão busca determinar, entre um conjunto de circuitos candidatos à expansão, quais devem ser construídos, de modo que o sistema opere adequadamente dentro de um horizonte de planejamento previamente conhecido, com o menor investimento possível. O problema é de difícil solução e apresenta alguns fatores complicadores: (i) apresenta vários pontos de mínimos locais, que leva a maioria dos

algoritmos a uma convergência prematura em um ponto de ótimo local; (ii) natureza combinatória do processo de decisão, que conduz a explosão combinatória de alternativas e conseqüentemente ao elevado tempo de processamento; (iii) a possibilidade da existência de sistemas elétricos não conexos, o que requer um tratamento especial para evitar problemas de singularidades no processo de otimização.

Na literatura podem-se distinguir três grandes grupos de algoritmos empregados na resolução do problema de planejamento da expansão de sistemas de transmissão:

#### **Algoritmos                      Heurísticos**

**Construtivos:** Estes algoritmos utilizam técnicas de otimização contínua. São robustos e encontram geralmente soluções de boa qualidade com pouco esforço computacional, porém dificilmente encontram soluções ótimas globais, principalmente em relação a sistemas reais e/ou de grande porte [1-2].

#### **Algoritmos                      de                      Otimização**

**Clássica:** Usam técnicas de decomposição matemática [3-4] e geralmente encontram soluções ótimas globais de sistemas de pequeno e médio porte. Entretanto, para sistemas de grande porte, estes algoritmos podem apresentar problemas de convergência e de esforço computacional.

#### **Algoritmos                      Combinatoriais:**

Encontram soluções ótimas ou sub-ótimas mesmo para sistemas de maior porte, porém com esforço computacional bastante elevado e até proibitivos. Entre os principais algoritmos de otimização combinatorial utilizados pode-se mencionar o Simulated Annealing [5], o Algoritmo Genético [6,7], o Algoritmo de Busca Tabu [8], entre outros.

Os algoritmos presentes neste último grupo, como já mencionado, são capazes de encontrar soluções ótimas e/ou sub-ótimas para sistemas de pequeno, médio e grande porte, porém com alto tempo computacional. Entretanto, sabe-se que a inicialização destes algoritmos tem fator preponderante na qualidade da solução e no tempo de execução destes métodos.

Diante do quadro descrito anteriormente, o trabalho proposto neste artigo pretende avaliar a utilização do algoritmo heurístico construtivo descrito em [9] como gerador de soluções iniciais para métodos combinatoriais, considerando-se que a eficiência do processo de busca no espaço de soluções é função das soluções iniciais factíveis.

## **II. Metodologia proposta**

Os Algoritmos Genéticos (GA) são modelos computacionais baseados na genética natural e no processo evolutivo. Basicamente inicia-se com uma população, na qual se aplicam operadores de seleção e recombinação para gerar novos pontos em um espaço de busca. Desta forma, o objetivo deste trabalho é agregar as vantagens da metodologia heurística já existente e a metodologia combinatorial.

De forma a obter soluções ótimas para sistemas de grande porte, a metodologia proposta baseia-se no algoritmo genético, porém com uma pequena particularidade. Através do algoritmo heurístico, obtém-se uma solução que é utilizada para inicializar o algoritmo genético. Desta forma, reduz-se o espaço de busca para o algoritmo genético, reduzindo o esforço computacional e encontrando boas soluções. A seguir serão detalhados algumas etapas e procedimentos.

### **II.1 Função Objetivo**

A função objetivo representa a qualidade de uma configuração, neste caso

específico ela avalia os custos de investimento na construção de novas linhas e penalidades associadas com o corte de carga. Os custos de investimento são funções de variáveis inteiras que representam a adição de uma nova linha de transmissão (variáveis de decisão).

Os algoritmos genéticos convencionais são formulados como problemas de maximização. Como o problema proposto tem o propósito de minimizar a função objetivo, foi realizada uma transformação para um problema equivalente de maximização, ou seja:

$$\min fob \Leftrightarrow \max \frac{1}{fob} \quad (1)$$

Esta é uma escolha importante no algoritmo, pois a eficiência do processo pode ser afetada. Este tipo de transformação foi utilizado, depois de comprovada sua eficiência de acordo com a literatura [10].

## II.2 Parâmetros de Controle

Apesar dos bons resultados encontrados através do emprego do algoritmo genético, alguns assuntos ainda permanecem em aberto: (i) a escolha dos parâmetros de controle; (ii) a função exata do crossover e mutação. No trabalho em questão, foram utilizados os seguintes parâmetros típicos: população entre 30 e 50; taxa de mutação entre 0,05 e 0,08; taxa de crossover entre 0,8 e 0,9.

## II.3 Principais Etapas do Algoritmo Genético Proposto

A Figura III.1 apresentada mostra as principais etapas do algoritmo genético proposto. A seguir são descritas estas etapas.

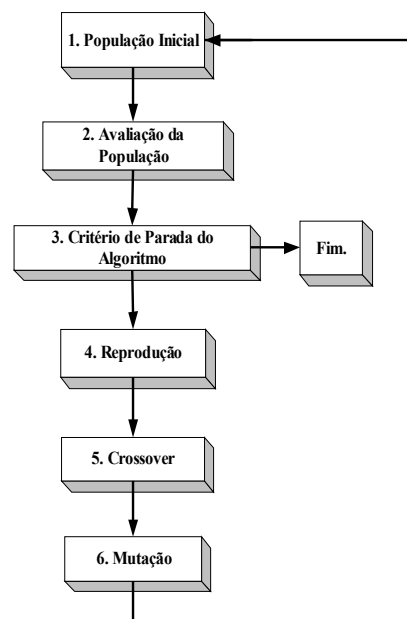


Figura III.1 - Etapas do AG.

### II.3.1 Determinação da população inicial

A solução obtida através do algoritmo heurístico é utilizada na construção da população inicial do AG, reduzindo o espaço de busca e o esforço computacional em comparação com uma inicialização aleatória.

### II.3.2 Avaliação da população

Nesta etapa do algoritmo são avaliados os indivíduos da população quanto a sua aptidão, ou seja, a capacidade individual de cada configuração na busca de uma solução ótima.

### II.3.3 Critério de parada

Durante o desenvolvimento da metodologia proposta, foram analisados dois critérios de parada distintos. Primeiramente, foi analisado o critério de parada relacionada com a estagnação da população, ou seja, após um determinado número de gerações sem melhoras na solução, o algoritmo converge. Porém este critério foi abandonado, pois se percebeu que mesmo após a estagnação da população

por várias gerações a solução pode melhorar, devido, dentre outros fatores, ao processo de mutação.

O outro critério de parada está relacionado ao número de gerações da população, ou seja, após atingir um número pré-definido de gerações o algoritmo converge. Este foi o critério adotado pela metodologia proposta, limitando o algoritmo normalmente em 100 gerações.

Se o critério de parada for satisfeito o algoritmo converge, senão, o algoritmo inicia uma nova etapa na qual são aplicados os parâmetros de controle.

### **II.3.4 Reprodução**

O algoritmo genético implementado apresenta um processo de reprodução baseado nos valores de aptidão dos indivíduos de uma geração. A probabilidade de um indivíduo reproduzir é proporcional a sua aptidão, ou seja, quanto maior a aptidão maior a chance de se reproduzir. Os indivíduos escolhidos para a reprodução são acasalados ao acaso.

### **II.3.5 Crossover**

Utilizou-se a aplicação de crossover em dois pontos, acontecendo com uma probabilidade pré-definida durante a procriação (a troca das partes do cromossomo ocorre aleatoriamente). O crossover tem a finalidade de estabelecer a troca de informação entre indivíduos de uma geração. Esse é um mecanismo de busca importante, pois juntamente com a mutação evita a estagnação da população em um determinado ponto de mínimo local.

### **II.3.6 Mutação**

No algoritmo proposto, cada indivíduo pode sofrer mutação independentemente, com probabilidade pré-definida. Esta mutação pode trazer alguns

benefícios para carga genética da população, tornando alguns indivíduos mais aptos à sobrevivência.

## **III. Estudo de Casos**

Os resultados obtidos pela metodologia proposta são apresentados para os sistemas reais equivalentes da região norte-nordeste do Brasil. Este sistema apresenta dois horizontes de planejamento, um plano P1 para uma demanda prevista de 20316 MW e um plano P2 para uma demanda prevista de 29748 MW.

Este sistema apresenta 87 barras, com 84 circuitos fictícios, 117 circuitos existentes na topologia base, 183 caminhos candidatos. Foram adotados os seguintes parâmetros: (i) tolerância ( $\epsilon$ ) de 1 MW para o corte de carga total permitido ao sistema elétrico; (ii) um número máximo de dezesseis expansões por caminho candidato. Tem-se um número total de  $17^{183}$  combinações possíveis de investimento.

### **III.1 Sistema Norte-Nordeste P1 Equivalente Sem Redespacho de Geração**

A topologia proposta tem um custo total de expansão igual a US\$ 1.425.357.000, com a construção de 61 novos circuitos. A melhor solução obtida, na literatura, apresenta um custo de investimento na transmissão de aproximadamente US\$1.356.272.000\* sendo encontrada em [11], utilizando algoritmo de decomposição matemática. Porém, o algoritmo heurístico [9] teve como solução US\$ 1.425.357.000, valor este também encontrado pela metodologia proposta. A tabela IV.1 mostra a comparação dos investimentos.

Tabela IV.1 – Comparação entre os custos de investimentos: Sistema Norte-Nordeste P1 SR.

<b>Sistema Norte-Nordeste P1 SR</b>	
<b>Algoritmos Utilizados</b>	<b>Custo Total de Investimento (em milhões de dólares)</b>
Algoritmo de Decomposição Matemática [11]	1.356.272
Algoritmo Heurístico Construtivo [9]	1.425.357
Algoritmo Proposto	1.425.357

Apesar do algoritmo de decomposição matemática apresentar um custo de investimento menor que o algoritmo proposto, não se tem conhecimento de sua topologia proposta para a expansão do sistema.

### III.2 Sistema Norte-Nordeste P2 Equivalente Com Redespacho de Geração

A topologia proposta tem um custo total de expansão igual a US\$

1.285.877.000, com a construção de 83 novos circuitos. A melhor solução obtida, na literatura, apresenta um custo de investimento na transmissão de aproximadamente US\$2.474.750.000, sendo encontrada em [11], utilizando algoritmo de decomposição matemática. A tabela IV.2 mostra a comparação dos investimentos.

Tabela IV.2 – Comparação entre os custos de investimentos: Sistema Norte-Nordeste P2 CR.

<b>Sistema Norte-Nordeste P2 CR</b>	
<b>Algoritmos Utilizados</b>	<b>Custo Total de Investimento (em milhões de dólares)</b>
Algoritmo de Decomposição Matemática [11]	2.474.750
Algoritmo Heurístico Construtivo [9]	1.285.877
Algoritmo Proposto	1.285.877

É interessante observar que o Algoritmo Heurístico [9] obteve uma significativa melhora em relação Algoritmo de Decomposição Matemática [11], uma redução de US\$1.188.873.000 e o algoritmo proposto não conseguiu melhorar a solução do algoritmo heurístico descrito em [9].

## IV. Conclusões

Constatou-se a dificuldade do Algoritmo Genético Proposto de encontrar soluções melhores que o algoritmo heurístico [9], mesmo partindo com uma população inicial “ótima”. Porém com

relação às outras metodologias existentes na literatura o algoritmo proposto mostrou-se melhor em algumas análises relativas ao sistema Norte-Nordeste. É interessante ressaltar que nenhuma das metodologias apresentadas neste trabalho garante o mínimo global.

Concluiu-se com este trabalho, que o algoritmo genético possui uma forte dependência com relação a sua inicialização, ou seja, quando o Algoritmo Genético (AG) é inicializado com os indivíduos obtidos do algoritmo heurístico [9], o algoritmo proposto converge para uma resposta ótima.

## Referências Bibliográficas

- [1] Garver L. L., “Transmission Network Estimation Using Linear Programming”, IEEE Trans. on PAS, Vol. 89, Nº 7, September, 1970.
- [2] Monticelli A., Junior, A. S., Pereira, M. V. F., Cunha, S. H., Parker, B. J., Praça, J. C. G., “Interactive Transmission Network Planning Using a Least-Effort Criterion”, IEEE Trans. on PAS, Vol. 101, Nº 10, October, 1982.
- [3] PEREIRA M. V. F., PINTO L. M. V. G., CUNHA S. H. F., OLIVEIRA G. C., “A Decomposition Approach to Automated Generation/Transmission Expansion Planning”, IEEE trans. on PAS, Vol. 104, Nº 11, November, 1985, pp.3074-3083.
- [4] LEVI V., CALOVIC M. S., “A New Decomposition Based Method for Optimal Expansion Planning of Large Transmission Networks”, IEEE trans. on PAS, Vol. 6, Nº 3, August, 1991, pp. 937-943.
- [5] Romero R., Gallego R. A., Monticelli A., “Transmission System Expansion Planning by Simulated Annealing”. IEEE trans. on Power Systems, Vol. 11, Nº 1, 1996.
- [6] OLIVEIRA S., ROMERO R., “Algoritmo Genético Paralelo Aplicado ao Planejamento da Expansão da Transmissão”, *XIII Congresso Brasileiro de Automática*, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, 2000, pp. 1790-1795.
- [7] Silva E.L, Gil H.A, Areiza J.M. “Transmission Network Expansion Planning Under an Improved Genetic Algorithm”. Power Industry Computer Applications, 1999. P.I.C.A '99. Proceedings of the 21st 1999 IEEE International Conference, 16-21 May 1999.
- [8] Silva E.L, Ortiz J.A., Oliveira G.C, Binato S., “Transmission Network Expansion Planning Under a Tabu Search Approach”. IEEE Trans.on Power Systems, Vol. 16, No 1, February 2001.
- [9] E.J. de Oliveira, Ivo C.S. Junior, J.L.R. Pereira, P.A.N. Garcia and Sandoval C.J., “Transmission System Expansion Planning Using a Sigmoid Function to Handle Integer Investment Variables”, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 20, Nº 3, Aug. 2005, pp. 1616-1621.
- [10] ROMERO R.; GALLEGO R. A.; MONTICELLI A., “Transmission System Expansion Planning by an Extended Genetic Algorithm”, IEEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 145, No 3, May 1998, pp. 329-335.
- [11] ROMERO R, MONTICELLI A., GARCIA A., HAFFNER S., “Test Systems and Mathematical Models for Transmission Network Expansion Planning”, IEEE Proc. - Gener. Transm. Distrib., Vol. 149, No 1, January 2002, pp. 27-36.